

online | Vortrag-3 der Gesundheitstechnischen Gesellschaft am 28. September 2023.

# Energiewende bauen – Verbundprojekt flexEhome

## Das Projekt flexEhome

Daniel Wolf, HPS Berlin

### Einleitung

Nachdem mit den ersten beiden Referaten die Grundlagen zum Verständnis gelegt wurden, eröffnete Dr. Wolf seinen Hauptvortrag **Das Projekt flexEhome** mit der Frage: hat das Einfamilienhaus (EFH) noch Zukunft? und beantwortete diese mit einer Erläuterung der Entwicklung im Bereich der Energieversorgung von EFH: Konsument, Prosument, Autark, flexEhome. Dr. Wolf beleuchtete die Engpässe im Verteilnetz, die Netzdienlichkeit im flexEhome, die Vollversorgung als Voraussetzung zur Netzdienlichkeit, die aus Simulationen gewonnenen H<sub>2</sub>-Füllstand-Jahresverläufe, die nach neusten Erkenntnissen umgesetzte Photovoltaikintegration im Gebäude, Planung und Realisierung des Gebäudes als Holzbau, das Zusammenspiel der technischen Komponenten, die modellprädiktive Regelung, gab einen Projekt-Ausblick und avisierte einen Folgevortrag in 2024 zur Auswertung der Messdaten aus dem Winterbetrieb.

Der folgende Beitrag fasst wichtige Aspekte des Vortrags zusammen.

### flexEhome – die Partner

Das Projektteam ist relativ groß, allen voran die beiden Lehrstühle von der TU Berlin, ETUS und HRI, die Kolleginnen und Kollegen von HPS Home Power Solutions AG, Berlin und weitere Unternehmen, die mit HPS kooperieren. Dazu zählen Transsolar, die Pioniere im solaren Bauen waren und sind, mit denen wir den Hausentwurf solar optimiert ausgearbeitet haben, den Architekten von JK&P, einem österreichischen Holzhaus Architekturbüro, der zusammen mit den Architekten von Albert Haus den Entwurf des flexEhome entwickelt hat. Albert Haus ist eine Holzbaufirma mit relativ langer Tradition und viel know how im Holzbau, die das flexEhome gemeinsam mit HPS gebaut haben. Die eingebaute Wärmepumpe und auch der Wärmespeicher und der Kältespeicher stammen von Vaillant.

### Hat das Einfamilienhaus noch Zukunft?

Allem voran stellt sich die Frage, sind Konzepte für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser ökonomisch wie ökologisch eigentlich zukunftsfähig? Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Flächenbedarf, wenn man in dieser Form baut, als auch als Folge daraus eine geringe Ressourceneffizienz in Bau und Betrieb. Dieser vordergründige Nachteil bringt auch gewisse Chancen mit sich. Das Verhältnis von einhüllender Fläche und Energienachfrage im Inneren des Gebäudes ist hier herausragend gut.

Es bietet sehr großartige Möglichkeiten, erneuerbare Energien vor allem über Strahlungsenergie zu ernten und zu nutzen. Heute schon ist es überhaupt kein Problem, mehr Energie in so einem Haus zu erzeugen, als es selbst verbraucht. Da braucht es gar keinen großartigen Dämmstandard zu haben. Das ist bereits relativ einfach möglich.

Durch konsequenten Holzbau wird der Dämmstandard deutlich angehoben, und auch Ressourcenverbrauch oder Ressourcennutzung wird dadurch, dass als Baumaterial vorwiegend Holz eingesetzt wurde, das an sich bereits CO<sub>2</sub> gebunden hat, auch noch einmal adressiert. Von daher ist das Projekt-Statement an dieser Stelle: Einfamilienhäuser in Zukunft: ja, definitiv. Aber dann bitte so, wie im flexEhome umgesetzt.

### **Entwicklung der EFH-Energieversorgung**

Das typische Haus aus den 80er Jahren ist reiner Konsument. Es hat selbst noch keine Möglichkeit, lokal erneuerbare Energie zu nutzen. Wärme und Strom, die im Haus benötigt werden, kommen von extern, aus einem Netz oder werden angeliefert. In Richtung Netz gibt es keine Übertragung.

Die sogenannten Prosumenten nutzen in der Regel Photovoltaik lokal, um Strom zu erzeugen, manche auch Solarthermie, um Wärme zu erzeugen. Bei den Prosumenten wird ein Teil des Haushaltsbedarfs über Photovoltaik gedeckt. Der zur Beheizung des Hauses benötigte Wärmeanteil ist bereits deutlich geringer als bei einem 80er Jahre Haus. Überschuss-Photovoltaik wird in das Netz einspeist. In Deutschland gibt es ca. 16 Millionen Einfamilienhäuser. 2 Millionen von ihnen sind mit Photovoltaik ausgestattet.

Der autarke Haustyp verfügt über umfangreiche Photovoltaik und versorgt sich komplett selbst. Es gibt keine Interaktion mit irgendwelchen Netzen. Von diesen Häusern gibt es ungefähr 150 in Deutschland. Es findet vor allem Solarthermie-Nutzung statt mit saisonalen Wärmespeichern. Da der saisonale Shift über den Wärmepfad geht, hat das zur Folge, dass der Wärmespeicher, der oft zehn Kubikmeter aufwärts misst, architektonisch eingebunden werden muss.

Beim flexEhome wurde dieser Weg nicht gewählt, sondern der saisonale Speicherpfad über den Wasserstoff umgesetzt. Dies erlaubt relative architektonische Freiheit. Wie diese genutzt wurde, wird im Folgenden dargelegt. Die Besonderheit, die sich das Projektteam zur Aufgabe gemacht hat, war, nicht das 151te autarke Haus zu bauen, sondern das Haus von Grund auf energetisch so auszulegen, dass es die Speicherkapazitäten, die es an sich schon mitbringt, um diese Vollversorgung zu generieren, so nutzt, dass es relativ flexibel mit dem Stromnetz interagieren und auf Bedarfe im Stromnetz reagieren kann.

### **Engpässe im Verteilnetz**

Warum ist es so wichtig, dem Stromnetz zukünftig nicht zur Last zu fallen, das heißt im Sommer Überschussstrom zu entsorgen und im Winter bei Dunkelflaute Strom zu beziehen? Warum müssen wir da umdenken? Die Ursachen hierfür liegen in der Auslegung des Verteilnetzes.

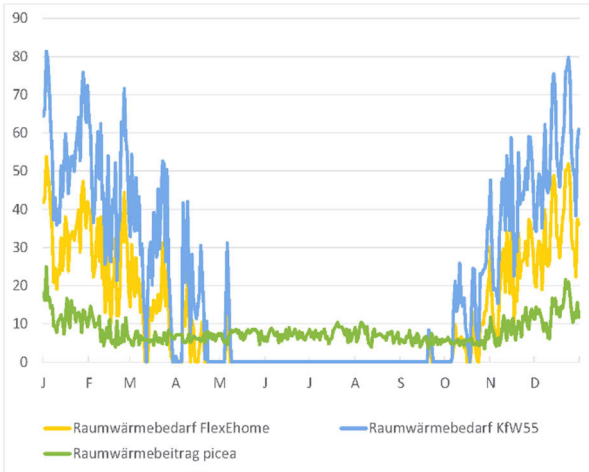
Als Verteilnetz sind Kupferleitungen direkt vor dem Haus in der Straße verlegt. Auf dem gleichen Spannungsniveau wie das Haus transportieren sie den Strom von den Verbrauchern weg und zu den Verbrauchern hin. Wie das in Zukunft aussehen wird ist nicht bekannt. Unter der Annahme, dass in den Jahren 2030/2035 nahezu jedes Haus in diesem Versorgungsgebiet über eine Wärmepumpe verfügt und ein Großteil mit Photovoltaik und Batteriespeicher ausgestattet ist, dokumentieren Simulationen, in welchem Umfang es zu Überschreitungen der maximalen Strombelastung, die, für die das Verteilnetz ausgelegt ist, kommen wird. Bei Überschreiten dieses Sollwertes wäre das Netz so nicht mehr betreibbar, ein ganzer Strang würde getrennt.

Wir können uns daher nicht darauf verlassen, im Winter irgendwie Strom aus dem dann überlasteten Netz zu beziehen. Da müssen wir etwas tun. Das ist der Bundesnetzagentur bewusst, und es wurden bereits Maßnahmen ergriffen. Hierzu zählt zum Beispiel Paragraph 14 a im EnWG der besagt, dass es dem Verteilnetzbetreiber tatsächlich erlaubt wird, steuerbare Verbraucher, dazu zählen auch die Wärmepumpen, einem Lastmanagement zu unterwerfen und sie zu steuern von extern. Perspektivisch lässt sich das auch am Netzanschlusspunkt umsetzen. Der Netzbetreiber gibt dann nicht nur der Wärmepumpe ein direktes Signal, bitte du darfst jetzt nicht beziehen, sondern dem ganzen Haus.

Genau diese Schnittstelle soll mit dem flexEhome umgesetzt werden. Ziel ist, dass das flexEhome in der Lage ist, von außen diesen Verteilnetz dienlichen Betrieb unter Einhaltung der Vorgabe aus §14a EnWG zu unterstützen, indem der Verteilnetzbetreiber nicht direkt auf eine Wärmepunkte zugreifen muss, sondern dass er dem kompletten Haus seine Bedürfnisse mitteilt und flexEhome dann ganzheitlich unter Optimierung aller Teilnehmer auch reagieren kann. Das ist eine Facette der Netzdienlichkeit im Projekt. Die zweite Facette ist ein System dienlicher Betrieb. Was steckt dahinter? Im Stromversorgungs-System gibt es Phasen mit relativ viel erneuerbarem Strom im Netz. Und es gibt Zeiten, wo es sinnvoll wäre, Strom einzuspeisen, und das ist eben nicht zu Zeiten, wo die Sonne scheint und der Wind weht. Das in Kombination verstehen HPS und das Team des Verbund-Forschungsprojektes als Netzdienlichkeit. Diese beiden Facetten sollen dem flexEhome beigebracht werden.

## **Vollversorgung – Voraussetzung zur Netzdienlichkeit**

Voraussetzung dafür, dem Haus volle Flexibilität in der Interaktion mit dem Stromnetz zu geben ist, dass es selber in der Lage ist, sich auch tatsächlich voll zu versorgen. Ausgehend von einem 80er Jahre Einfamilienhaus mit 160 m<sup>2</sup> Wohnfläche und angenommenem Dämmstandard KfW55, den es in der 80ern noch nicht gab, wird deutlich: Zwischen dem Wärmebedarf und dem Ertrag einer 12 kWp PV-Anlage klafft in der kalten Jahreszeit von Oktober bis April eine Versorgungslücke, die es zu schließen gilt. Mit einem Tages-Nachtspeicher, also Batteriespeicher und Warmwasserspeicher, ist dies im Sommer kein Thema. Um die Energienachfrage systemisch zu meistern, muss ein Schritt weiter getan werden. Und dies ohne Reduktion des Bedarfs, ohne Passivhaus-Dämmstandard, ohne Vergrößerung des Wasserstoffspeichers.



Wie in den Nutzungsgrad-Analysen von Raik Fahrlich zuvor dargestellt, erfolgt das Raumwärme-Angebot nicht nur von picea über die Wasserstoffstrecke. Auch die über den Batteriespeicher und die Leistungselektronik eingesammelte Abwärme wird an das Haus abgegeben. Das allein genügt jedoch noch nicht. Ziel führend war, den Dämmstandard über KfW55 hinaus etwas zu steigern.

**Bild 1: Raumwärmebedarf [kWh/d]**

In Gelb dargestellt ist die errechnete Raumwärme-Nachfrage für den flexEhome-Dämmstandard, der als anzustrebender Dämmstandard herausgerechnet wurde mit den Kolleginnen und Kollegen vom HRI. Der FlexEhome Raumwärmebedarf liegt ca. 40% unter dem eines KfW55 Hauses. Es handelt sich hier noch nicht um Passivhaus-Standard. Das war nicht das Ziel. Es sollte ein ganzes Stück vom Passivhausstandard entfernt sein, aber ausreichen, um diese Lücke zu decken mit einer Wärmepumpe.

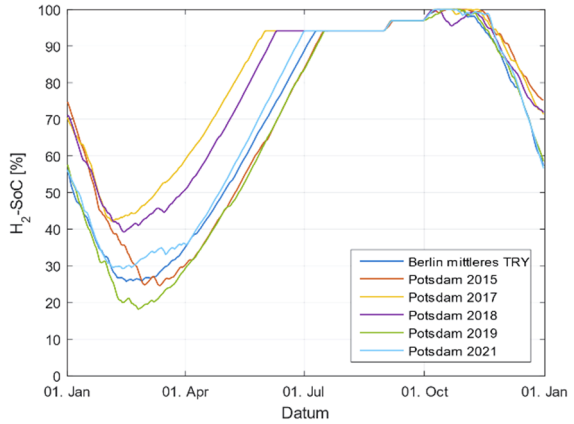
Diese Wärmepumpe kann sich im Wechsel mit der Brennstoffzelle mit Strom versorgen aus dem PV-Direktanteil, der auch im Winter vorhanden ist, und aus dem Batteriespeicher. flexEhome ist damit auch im Winter zu 100% in der Lage, Raumwärme, Brauchwarmwasser und Strom mit den lokal genutzten und gespeicherten erneuerbaren Energien zu decken und ist nicht darauf angewiesen, zu Dunkelflautenzeiten einen hohen und CO<sub>2</sub>-belasteten Netzbezug zu generieren.

Das ist die energietechnische Roadmap im Verbundforschungsprojekt flexEhome.

## Wasserstoff-Füllstand

Der Füllstand-Verlauf des flexEhome-Wasserstoffspeichers ist in allen Installationen, die picea einschließen, in etwa gleich. Es gibt nur einen Speicher-Zyklus pro Jahr, denn der saisonale Speicher hat zum Ziel, den Sommer-Überschuss in den Winter zu transportieren. Im Winter wird Wasserstoff verbraucht, die Brennstoffzelle läuft. Im Frühling gibt es ein Plateau, wo das Haus schon in der Lage ist, sich mit Kurzzeit-Speicher plus lokal genutzter Photovoltaik selbst zu versorgen. Etwa ab März, ist es an manchen Tagen wieder möglich, auch Wasserstoff zu erzeugen und zunehmend den Wasserstoffspeicher zu füllen. Das flexEhome ist Anfang Juli damit zunächst fertig. Warum wird der Speicher nicht weiter geladen? Das hängt damit zusammen, dass es mit sich um Gas handelt in einem isochoren Behältnis, das den Druck abhängig von der Außentemperatur ändert. Ist es draußen kälter, sinkt der Druck im Behälter.

Das schafft Raum, um nachzuladen. Im Laufe des Jahres, wenn es draußen kühler wird, ist es wieder möglich, zuzuladen, um die volle Speicherkapazität auszunutzen. Im Oktober, November, beginnt dann die Phase, wo das lokale Energieangebot nicht mehr ausreicht und es deshalb aus dem Wasserstoffspeicher bedient werden muss.



**Bild 2: flexEhome H<sub>2</sub>-SoC-Verlauf**

Es gilt jetzt zu ermitteln:

wieviel Wasserstoff muss vorgehalten werden? Im flexEhome beträgt die Speicherkapazität 1500 kWh elektrisches Äquivalent. Das entspricht ungefähr dem Wirkungsgrad von 45% bis 50% der Brennstoffzelle, d.h. 3000 kWh chemischer gebundener Energie im Wasserstoff. Da ein Flaschenbündel 600 kWh beherbergt, wurde die Planung mit fünf Flaschenbündeln umgesetzt. Das Fünfte Flaschenbündel wurde hinzugenommen, wird wahrscheinlich aber nicht benötigt. Das wird sich zeigen. Vier würden wahrscheinlich reichen mit insgesamt 1200 kWh elektrisch oder 2400 kWh chemisch. Soweit zur Wasserstoffseite.

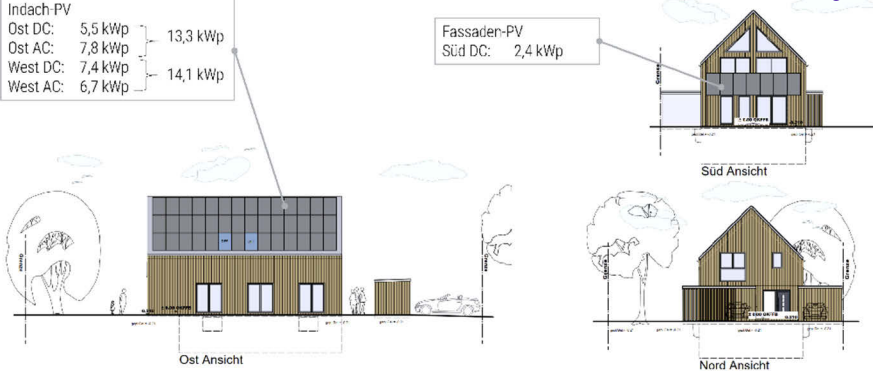
**Photovoltaik-Integration**

Wie der benötigte Wasserstoff intelligent zu ernten ist am Haus, darüber haben sich HPS, Transsolar, HRI und Architekten viele Gedanken gemacht. Die solare Nutzung, die Photovoltaik, sollte harmonisch ins Haus integriert werden im Sinne einer komplett in das Gebäude integrierten Photovoltaik-Anlage. Dies wurde gelöst über Indach- und Fassaden integrierte Photovoltaik.

Indach-PV	
Ost DC:	5,5 kWp
Ost AC:	7,8 kWp
West DC:	7,4 kWp
West AC:	6,7 kWp
} 13,3 kWp	
} 14,1 kWp	

Fassaden-PV	
Süd DC:	2,4 kWp

**Bild 3: Photovoltaik-Integration**



In der Südfassade wurden 2,4 kWp installiert, 90 Grad an der Fassade, und auf dem Satteldach mit 45 Grad Neigung, Ost-West ausgerichtet, jeweils ungefähr 13 bis 14 angeordnet. Es wurde dabei nochmals unterschieden in DC und AC Photovoltaik. Die DC-Photovoltaik ist direkt an picea angebunden. Um Wasserstoff zu erzeugen, wird der Elektrolyseur direkt aus dem Photovoltaikstrom betrieben.

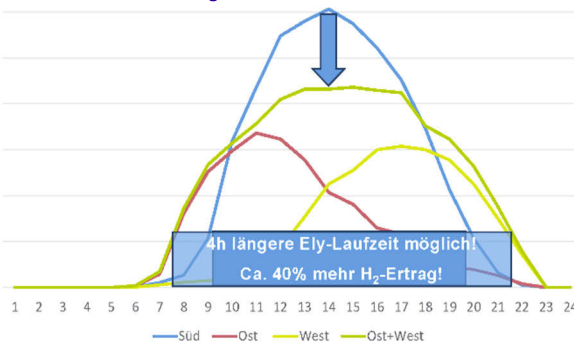
Ein Teil der installierten Leistung ist AC-seitig angebunden über einen gewöhnlichen Wechselrichter, der die Haushaltslasten ohne Umweg über einen Batteriespeicher oder den Wasserstoffpfad decken kann. Soweit zur Konfiguration.

### Warum Ost-West-Ausrichtung?

Grundidee bei einer Südfassaden-Photovoltaik ist das effiziente Nutzen der tief stehenden Winter-Sommersonne. Warum wurde flexEhome Ost-West ausgerichtet? Die Antwort liefert der Vergleich eines Tagesgangs der Photovoltaikanlage:

Die Grafik zeigt den Verlauf bei gleicher installierter Leistung mit unterschiedlicher Ausrichtung. In Blau: komplett nach Süden ausgerichtet. Grün: die gleiche installierte Leistung nach Ost-West ausgerichtet. Die einhüllende Kurve setzt sich zusammen aus dem Ostteil und dem Westteil. Der Ostanteil bringt relativ früh am Morgen einen hohen Ertrag, der noch vor dem Mittagstief abfällt, wenn die Sonne auf die andere Hausseite wandert. Der Westanteil bringt in den Abendstunden den meisten Ertrag.

**Bild 4: PV-Ausrichtung**



Die bisher bevorzugte Konfiguration wäre bei Photovoltaik, südausgerichtet 35, 37 Grad geneigt. Übers Jahr betrachtet bringt dies den meisten Ertrag und den größten finanziellen Nutzen im Falle einer konstanten Einspeisevergütung.

Darum wird es zukünftig immer weniger gehen. Es findet ein Umdenken statt.

Photovoltaik wird so ausgerichtet, dass ein Maximum an Stromertrag erreicht wird zu den Zeiten, wo er dringend benötigt wird. Im flexEhome sind das im Sommer, wenn Elektrolyse betrieben wird die frühen Morgenstunden und die späten Stunden. Ein Mittagspeak wird dadurch relativ stark vermieden. Nochmal zurück auf die Elektrolyse. Bei südausgerichteter Photovoltaik-Anlage ist deren Nutzung über ungefähr zehn Stunden möglich. In der Ost-West ausgerichteten Anlage gibt es nochmal 40% mehr oder 4 Stunden mehr Ertrag. Das bedeutet, dass bei Ost-West-Ausrichtung deutlich mehr Wasserstoff generiert werden kann für den Winter als in der reinen Südausrichtung. Und dies, obwohl die Südausrichtung den maximalen Solarertrag übers Jahr erzielt.

## flexEhome – das Haus



Bild 5: flexEhome

So sieht das Haus heute aus. Es steht in Schöneiche und wird von einer vierköpfigen jungen Familie bewohnt seit 1. September wie von einer ganz normalen Familie. Für das Projektteam ist dies ein willkommener Testbetrieb, in dem hoffentlich gezeigt werden kann, dass das funktioniert, was in den Simulationen vom Projektteam er-sonnen wurde.

Der Wasserstoffspeicher, ist das, was hinten rechts zu sehen ist. Durch die dicht angeordneten Bretter sind ein bisschen die Flaschenbündel erkennbar, die durchscheinen. Rechts außen zu sehen ist auch die Außeneinheit der Wärmepumpe von Vaillant. Oben zu sehen ist die Indach-Photovoltaik, auf der Ost-Seite ein bisschen weniger Kapazität als auf der Westseite, da hier drei Dachfenster mit integriert sind, auf der anderen Seite nur eins, und vorne die 2,4 kW Fassaden-Photovoltaik.

## Der Technikraum



Bild 6: Technikraum

picea wurde bereits vorgestellt. Im flexEhome wurde der picea Standard mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet. Rechts der 10 kW AC-Wechselrichter. Mit der AC-Kapazität von 7,2 kW von picea ergeben sich in Summe 17 kW Wechselrichter-Leistung bei knapp der doppelten installierten Photovoltaikkapazität von 30 kWp.

Die linke Seite ist Wärme orientiert: ein ganz normaler Schichten-Pufferspeicher, ein Kombispeicher sowohl für Brauchwarmwasser als auch für Raumwärme. Weiter hinten: ein kleiner Pufferspeicher für Kaltwasser. Im Sommer kann das Haus gekühlt werden.

Dazu wird die Temperatur pauschal um zwei bis drei Grad abgesenkt. Mit dem Primärenergie-Angebot, das im Sommer vorhanden ist, ist dies völlig emissionsfrei darstellbar und überhaupt kein Luxus.



Als weitere Komponenten sind zu sehen: Vorne links die Frischwasserstation, hinten in der Ecke die Inneneinheit der Wärmepumpe. Oben ist die Lüftungsanlage. Die Zuluft wird von picea geliefert. Links kommt die Abluft zurück aus den Räumen und wird dann über ein ganz gewöhnliches Verteilsystem in die einzelnen Räume verteilt.

### **Modell prädiktive Regelung**

Der eigentliche Kniff, an dem das Projektteam insbesondere von ETUS und HPS derzeit arbeiten umzusetzen, ist, wie der Wärmeerzeuger Wärmepumpe zusammen mit dem auch Wärmeerzeuger und Stromerzeuger Brennstoffzelle im Winter zusammenspielt. Um die beiden Komponenten in Synergie arbeiten zu lassen, wurde eine Modell prädiktive Regelung entwickelt, die auf einem kleinen Einplatinenrechner in picea läuft und den Betrieb der Wärmepumpe als auch der Brennstoffzelle online optimiert unter Nutzung von Solarprognosen, thermischen und elektrischen Lastprognosen.

Das Zusammenspiel dieser beiden Energiewandler, also Wärmepumpe und Brennstoffzelle, nutzt eine thermodynamische Gegebenheit: Wärmepumpen sind in ihrem COP, in ihrer Effizienz, wie sie Umweltwärme in nutzbare Raumwärme umwandeln, hochgradig Außentemperatur abhängig. Das heißt, wenn es draußen sehr kalt wird, sinkt auch der COP und damit die Effizienz der Umwandlung. Bei der Brennstoffzelle ist das nicht so. Es gibt keine Abhängigkeit von der Außentemperatur, im Gegenteil: wenn die Kühlluft kalt ist, steigt der Wirkungsgrad etwas. Dieser Zusammenhang wurde in der Modell prädiktiven Regelung abgebildet, so dass sie mathematisch optimiert steuert, wann ist es sinnvoll, für die nächsten 24 Stunden die Brennstoffzelle einzusetzen, und wann ist es sinnvoller, die Wärmepumpe einzusetzen, um so zu einem gesamtenergetisch optimalen Betrieb zu kommen.

### **Ausblick**

Das flexehome ist seit September bewohnt. Es gilt deshalb im kommenden Winter zu zeigen, dass das über Simulationen errechnete Ziel der Vollversorgung und der damit einhergehenden Flexibilität zum Stromnetz erreicht werden kann. Das Projektteam ist bereits sehr gespannt, ob das klappt, und freut sich darauf, vielleicht in einem Jahr, die Messergebnisse dessen, was der reale Betrieb der gesamten Anlage gebracht hat, zu präsentieren und im Fachforum der Gesundheitstechnischen Gesellschaft (GG) zu diskutieren.

### **Referent | Autor**

Dr.-Ing. Daniel Wolf, HPS Home Power Solutions AG, Berlin, ist Bereichsleiter für Vorentwicklung und Forschung sowie Verbundkoordinator im Forschungsprojekt flexEhome. [daniel.wolf@homepowersolutions.de](mailto:daniel.wolf@homepowersolutions.de)



### **Copyright © 2023**

Gesundheitstechnische Gesellschaft (GG) – Technisch-wissenschaftliche Vereinigung